

陆家佑 著

岩体力学 及其工程应用

(第2版)

Rockmass
Mechanics



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

陆家佑 著

岩体力学 及其工程应用

(第2版)



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书简要叙述了作为岩体力学理论基础的弹塑性理论、强度理论和流变理论，介绍了岩体中不连续面和含有不连续面的非均匀岩体的力学特征，以及如何根据岩体力学特性和工程与岩体相互作用关系，建立了简单实用的力学模型，把固体力学相关分支融入岩体力学，并纳入工程应用。

本书工程应用部分重视理论与工程实践紧密结合，着重介绍作者在压力隧洞、隧洞围岩稳定性和重力坝坝基稳定性方面的研究成果，对生产单位和研究单位工作人员有一定参考价值，亦可供研究生和本科生作为教学参考书。

图书在版编目（C I P）数据

岩体力学及其工程应用 / 陆家佑著. -- 2版. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2017. 9
ISBN 978-7-5170-5926-4

I. ①岩… II. ①陆… III. ①岩石力学 IV.
① TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 240157 号

书 名	岩体力学及其工程应用（第 2 版）
作 者	YANTI LIXUE JI QI GONGCHENG YINGYONG 陆家佑 著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：（010）68367658（发行部）
经 售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京图语包装设计有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 13.25 印张 245 千字 1 插页
版 次	2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷 2017 年 9 月第 2 版 2017 年 9 月第 2 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	60.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

序一

挚友陆家佑的专著《岩体力学及其工程应用》再版，嘱为之序。

读完全书，一段尘封的历史跃然纸上。那时投身岩体力学有明确的目标、任务和时限。20世纪50年代，国家积极准备建设长江三峡水力发电工程，专门成立了长江流域规划办公室（简称长办——国务院第十三办公室），周恩来总理兼任主任，副主任是水利部副部长林一山。长办有长江科学院，院里专设三峡岩基组，组长是陈宗基先生，“文化大革命”以后被选为中科院院士。为了加强岩基组的科研力量，从中国科学院、水利水电部水电科学院等14个单位抽调科研人员支援三峡建设，任务是全面研究和积极解决：三峡大坝、地下厂房、隧洞、地基和边坡稳定，岩体物理化学性质、室内外试验、灌浆加固和动力爆破等许多科学技术和工程施工问题。家佑与我先后奉调岩基组，和金汗平、李先伟、林天健、葛修润、席政国、梅剑云、周思梦、裘孟辛、陈彦生等走到了一起，开始了岩石力学研究工作，由相知相识，同甘共苦，开启了五十余年的真挚友谊。

当时，岩体力学还处在萌芽状态，国内外都没有现成的成功经验可以借鉴。我们知道，岩石具有许多固体共有的性质，但是岩体中构造断裂形成的不连续面异常发育，研究岩石力学将遇到许多想象不到的困难。对研究成果的要求是创新，有道是：科学的目的是认识世界，成果是创造；技术的目的是改造世界，成果是发明；经济学的目的是资本升值，成果统称创新。就这样，国家要求我们将研究岩体力学，以创造和发明作为毕生事业。家佑这本书的内容背后反映了这段特定的岩体力学史实。

没有想到的是，更大的困难是工作环境。当时国家正处在“大跃进”后的

困难时期，粮食限量，体能下降，开始浮肿，四肢无力；岩基组要求业余开办复分析和连续介质力学讲座，我和家佑主讲，彦生一直坚持；反映了对岩体借用连续介质思维的阶段；石根华开创了岩石块体理论和后来的非连续变形分析方法。接着，“文化大革命”开始了，家佑工作的单位中国水利水电科学院和中科院一度都被撤销，他被迫在施工单位和设计单位之间游荡十年。20 世纪 80 年代初，家佑曾在清华大学任专职教师，为研究生开设岩体力学课。在动荡岁月，这可真是不幸中之大幸。

非常难得的是，家佑长期坚守在岩体力学领域，从多视角审视研究岩体力学，根据任务需要做了各种课题，终成正果。特别是：实验室内岩石小试块变形和强度试验；野外原位岩体变形和强度试验；原位岩体应力测试和地下工程开挖过程岩体变形检测；以实际工程为对象，分别用物理模拟方法和数值分析方法研究大坝稳定性；水压力作用下隧洞衬砌与岩体联合作用的理论研究；硐室岩爆预测及治理；在外界爆炸作用下地下工程围岩稳定性理论研究等。

无论研究课题大小，家佑都是满腔热忱，认真工作，深入钻研，为人低调，深得同行拥戴。哪怕实验室内岩石小试块强度试验，只是常规试验，家佑也认真对待；从岩石破坏机制得到深刻认识，因而三十年后为他研究硐室岩爆时从中得到重要启发。

岩爆是国外研究了一百年未能圆满解决的问题。对其破坏准则万变不离其宗，几乎所有研究者都是以岩石极限抗压强度作基准，各自建议乘以不同的系数；工程上所有系数，包括安全系数，实为糊涂系数。家佑经过现场观察，从岩爆的破坏痕迹，找到岩爆破坏规律，并建议了岩爆破坏准则和其强烈程度的判定。然后用物理模拟方法和数值计算方法做了岩爆预测和工程治理系统研究，努力去掉糊涂系数。

对于隧洞水压试验研究岩体变形特性，在 20 世纪国内外都发表过许多成果。家佑与他的团队从实验结果中得到启示，分别完成了在内水压力作用下，水工隧洞衬砌与各向异性弹性岩体和衬砌与弹塑性岩体联合作用两项理论研究。

以往，由于岩石地基上应力计算的困难，对于坝基可能沿某条软弱面滑动失稳，只能用极限平衡理论判定其抗滑稳定安全系数，但是极限平衡理论概念太过简单化，计算结果随意性很大。家佑认为在数值计算方法可以提供较接近实际坝基应力状态的今天，可以仿效结构构件设计，用大坝破坏的起始应力状态作为安全准则。用非线性理论得到大坝崩溃时的应力状态决定安全系数，不仅繁琐，而且是用先进的应力分析方法最终仍回到陈旧的理念上，得到的还是含混不清的糊涂结果。

第2版中，《岩体力学及其工程应用》增加了“洞室围岩动力稳定性”一章，对地面爆炸源作用时，地下工程围岩稳定性的理论研究，采用的是不可压缩理想流体力学模型，这就是20世纪五六十年代我国流行的爆炸流体动力学，曾在定向爆破筑坝工程应用中，得到较好的效果。

《岩体力学及其工程应用》（第2版）是一本学风严谨、思维缜密、行文简洁、以创新为主线、理论联系实际的好书。我愿向力学工作者以及相关专业的工程师、研究工作者、研究生和高年级学生郑重推荐。

是为序。

郭友中

中国科学院数学计算技术研究所（武汉）

2015年11月

序二

欣逢老友陆家佑八十二寿辰及其著作再版，恭贺之际，自有感慨万千。

我们相识于 1956 年 9 月，正值北京秋高气爽，电力工业部水电科学研究院在东郊挂牌的时候。工业建设的进展和向科学进军的高潮使我们觉得生正逢时，大有可为。在迎新会后，我们沿着门前的柏油路向东走，盛赞社会主义经济建设欣欣向荣。联系到我们即将从事的岩体力学研究 and 今后十年二十年水电建设的宏伟规划，更是摩拳擦掌，立志请缨。经过暑假的闲置，附近的足球场长满了野草，我们秉兴坐在地上，仰望蔚蓝的天空和西山的白云，畅谈国家远景和个人前程。兴奋之中不觉晚霞退出远处的树梢，夜幕降临。

然而，千里之行，始于足下。当时岩体力学研究在我国刚刚开始，外汇短缺，仪器设计和加工的力量薄弱，更加上我们没有经验，无人指导，全靠自己摸索，真是困难重重。尤其使我感到力不从心的是本身力学基本功太差，有如根子不深的植物其叶必然不会茂盛，很希望有机会脱产学几年固体力学。虽然是初相识，我为他的推心置腹所感动，向他谈到一件没有与旁人提起过的憾事。毕业前几个月，学校曾提名我报考留苏研究生，通过了体格检查，也复习了 15 门课程准备应试，最后因政治条件不够没有资格参加考试，深为惋惜。家佑劝我立足国内，自力更生。他没有摆革命的大道理，而是劝我不必遗憾，出国深造对人有好处，出不了国也能为祖国做出贡献，只要坚持，一定会做出成绩。他既如此劝我，本人也身体力行，几十年如一日，果然成绩斐然。

改革开放以前物质条件之差，交通之不便，是现在的人想象不到的。在云南做野外实验的人好像到了古代的边陲；在黄河上游靠牲口运送笨重设备；去湘西沅江勘探工地得翻山越岭，步行十多个小时，常年吃发霉长蛆的豆豉。然

而，那个时代的人工作热情高，克己奉公，以吃苦为荣，并在千辛万苦地完成任务后还检查自己的缺点，归咎于思想改造之不足。印象最深的是国庆十周年，家佑、陈凤翔、叶金汉和我各自在武汉、北京和福建工作，繁忙之中仍然书信穿梭来往，探讨岩体力学的研究方向和长远规划。以我们浅薄的知识和卑微的地位去关心偌大的题材，难免引人发笑。为了对付刻薄的讽刺，我以韩愈的诗句说服自己：“人皆讥造次，我独赏专精。”感谢黄文熙教授和覃修典教授两位副院长对后生的信任，1962年的十年规划（中科院和水电部各一份）中有关岩石力学的章节真的交给了我起草。有了三年前四人讨论的基础，我们的愿望和热忱也就顺理成章地变成了领导制定该部分规划的初稿。

家佑很关心集体水平的提高。三年困难时期，领导号召劳逸结合，他团结爆破组和岩石力学组的业务骨干进修数学，自学和集体讨论的方式以复变函数为起点，争取无师自通，充分利用了这段闲散时间，为后来的工作开展创造了有利条件。在他的鼓励之下，我还写了一本书介绍国外坝基处理的经验，水平不高却有一定的实用参考价值，没有虚度光阴。想不到，1965年被别人偷去发表，是家佑阻止我声张。当时没有知识产权的概念，又是工业交通会议之后突出政治的高潮，盗窃成果者固然可耻，也不提倡保卫个人权益。家佑告诫我要当无名英雄，不要为屑小的损失而一叶障目，看不见大方向。他在关键时刻的指点使我少了许多麻烦，变得心胸开阔，更加专心致志。

“文化大革命”之后，家佑归队较晚，他克服多种不便，在动荡的生活中学习和追赶科学发展的新形势。20世纪80年代出国留学的高潮中，他坚守岗位。在清华大学筹备岩石力学课程，更是客观压力大，又无前例可循。他夙夜匪懈，呕心沥血，终于及时开讲，没有辜负黄文熙教授等老前辈对他的厚望。当时恢复高考，很多中年父母全力以赴，苦心孤诣地辅导子女闯过升学的难关，家佑也面临考验，为公为私不能两全，只好放弃一头把困难留给自己，集中精力从事教学和科研。

《岩体力学及其工程应用》篇幅不大，可来之不易。友中的序言对它的价值和独到之处已有详尽的介绍。我为之感叹的是与这本书相映的作者奋斗的历史。

程和热忱。家佑的坦荡和诚恳很像他父亲陆叔言先生。陆伯父自 20 世纪 20 年代初上海南洋公学（交通大学前身）电机系毕业后，1931 年与友人在四川重庆创办实业，在抗日战争中作出贡献，尽到自己的一份力量。1949 年新中国成立后，他作为一名知识分子努力参加国家建设，主动放弃上海舒适的生活，先后参加过长春第一汽车厂、洛阳拖拉机厂、四川德阳重型机械厂的建厂工作。1956 年冬，他回上海度假，因为他被评为当年第一汽车厂先进工作者，机械工业报记者去他家采访，正巧我出差上海去看他时，新闻记者为他拍照，我也帮忙移动家具，替摄影师高举镁光灯。没想到六十年后，家佑的著作再版，要我写篇序，实际上给了我一个学习的机会。从举镁光灯到写序，让我见证了陆家父子两代人对国家的贡献，真是“三生有幸”。联想到六十年来风云变幻和同辈人的忧患得失，这句口头禅却带给我浓厚的历史感和对人生奋斗历程的无限回味。

读罢家佑的新稿和友中的评论，回顾本专业的发展，我曾掩卷长叹：“假如我辈起步时具有现在年轻人所享有的优越条件，成绩应该比我们实际得到的会大很多！”相信后来者居上，下一代一定能创造奇迹，造福人类，增辉祖国。

我谨借此机会向散居各地的专业朋友问候，致敬！虽然语义皆庸，权代一席之言：各位人生经历虽然各不相同，常闻不断探索与创新则是相同的。因此，特别是在国家大力提倡创新的今天，再版家佑的新作具有更多的借鉴和启迪意义，希望见到你们和广大专业工作者，多出版宝贵成就与精彩人生的新作！

金汉平

于美国加州

2015 年 11 月

第 2 版前言

岩体力学作为一门学科还十分年轻，但是岩石作为建筑材料历史悠久，世界上许多著名的古代建筑物是由岩石建造的，岩石是自然界赋予人类的天然建筑材料，有价廉物美、取之不尽用之不竭、强度高、耐磨、防火等优点。并且只要根据人类的需要切割成形即可，不需任何化学加工。

岩石当做建筑材料，总是选好的岩石切成小块，避开了天然裂隙，强度都很高。因为安全上没有多大问题，对它的力学性质的研究就不迫切。单独取一小块岩石，不包含不连续面，与其他固体有许多共同点，可以当作连续介质，应用连续介质力学处理。

岩体力学真正受到重视与近代工业的发展分不开，大坝基础、地下厂房、压力隧洞、铁路和公路隧道、煤矿和金属矿以及石油开采等工程推动了岩体力学发展。由于工程涉及的范围较大，断层、层面、节理、裂隙等不连续面不可避免，岩体的力学性质和应力传递机制受其影响，这就注定近代岩体力学的研究对象绝非岩石小块体，而是包含各种尺度不连续面的岩体，因而连续介质力学的应用是有条件的，对于错综复杂的客观状态必须具体问题具体分析。**把经典固体力学与岩体的不连续性相结合，解决各种实际问题，这就是岩体力学。**

本书前 6 章为岩体力学理论基础，后 9 章为工程应用。第 1 章介绍了岩体中不连续面的力学特征；第 2 章、第 3 章、第 4 章分别叙述了岩体弹塑性理论、岩体强度理论和岩体流变理论；第 5 章和第 6 章分别叙述了不连续面呈规律分布的层状岩体和不连续面随机分布的复杂岩体；第 7 章针对隧洞水压试验反映的岩体各向异性性质，建立了适用于各向异性岩体中压力隧洞衬砌应力计算方法。第 8 章基于岩体的塑性变形性质和某工程压力隧洞衬砌发生纵向裂缝事故，建立了弹塑性岩体中压力隧洞应力计算方法；第 9 章回顾了地下工程设计思想

的发展，并讨论了地下工程设计的可能发展趋向；第 10 章叙述岩爆发生的条件并根据岩爆造成的围岩破坏机制建立的产生岩爆的强度准则；第 11 章用试验结果讨论了天生桥引水隧洞发生岩爆的原因，以及鲁布革电站只产生脆性破坏但不发生岩爆的原因；第 12 章用光弹性试验研究了两条平行隧洞岩爆相互影响的可能性；第 13 章首先介绍根据岩爆分析岩体应力，然后把数值计算方法应用于岩爆预测与治理；第 14 章假定爆炸能量传递时，岩体近似成不可压缩流体，然后对地面爆炸时硐室围岩稳定性作了理论研究；第 15 章叙述有软弱夹层的重力坝在失稳过程的两种力学状况：稳定滑动与黏滑，并根据软弱夹层失稳后的力学特征，确立失稳准则。

作者

2017 年 1 月

第 1 版前言

岩体力学作为一门学科还十分年轻，但是岩石作为建筑材料历史悠久，世界上许多著名的古代建筑物是由岩石建造的，岩石是自然界赋予人类的天然建筑材料，有价廉物美、取之不尽用之不竭、强度高、耐磨、防火等优点。并且只要根据人类的需要切割成形即可，不需任何化学加工。

岩石当做建筑材料，总是选好的岩石切成小块，避开了天然裂隙，强度都很高。因为安全上没有多大问题，对它的力学性质的研究就不迫切。单独取一小块岩石，不包含不连续面，与其他固体有许多共同点，可以当作连续介质，应用连续介质力学处理。

岩体力学真正受到重视与近代工业的发展分不开，大坝基础、地下厂房、压力隧洞、铁路和公路隧道、煤矿和金属矿以及石油开采等工程推动了岩体力学发展。由于工程涉及的范围较大，断层、层面、节理、裂隙等不连续面不可回避，岩体的力学性质和应力传递机制受其影响，这就注定近代岩体力学的研究对象决非岩石小块体，而是包含各种尺度不连续面的岩体，因而连续介质力学的应用是有条件的，对于错综复杂的客观状态必须具体问题具体分析。**把经典固体力学与岩体的不连续性相结合，解决各种实际问题，这就是岩体力学。**

本书前 6 章为岩体力学理论基础，后 6 章为工程应用。第 1 章介绍了岩体中不连续面的力学特征；第 2 章、第 3 章、第 4 章分别叙述了岩体弹塑性理论、岩体强度理论和岩体流变理论；第 5 章和第 6 章分别叙述了不连续面呈规律分布的层状岩体和不连续面随机分布的复杂岩体；第 7 章针对隧洞水压试验反映的岩体各向异性性质，建立了适用于各向异性岩体中压力隧洞衬砌应力计算方法；第 8 章基于岩体的塑性变形性质和某工程压力隧洞衬砌发生纵向裂缝事故，建立了弹塑性岩体中压力隧洞应力计算方法；第 9 章回顾了地下工程设计思想

的发展，并讨论了地下工程设计的可能发展趋向；第 10 章叙述岩爆发生的条件并根据岩爆造成的围岩破坏机制建立的产生岩爆的强度准则；第 11 章首先介绍根据岩爆分析岩体应力，然后把数值计算方法应用于岩爆预测与治理；第 12 章叙述有软弱夹层的重力坝在失稳过程的两种力学状况：稳定滑动与黏滑，并根据软弱夹层失稳后的力学特征，建议了失稳准则。

作者

2011 年 1 月 10 月

目 录

序一	
序二	
第 2 版前言	
第 1 版前言	
第 1 章 岩体不连续面的力学特征	- 1 -
1.1 引言	- 1 -
1.2 不连续面的变形特性	- 1 -
1.3 不连续面的强度特性	- 4 -
1.4 不连续面的可能破坏机制	- 6 -
参考文献	- 6 -
第 2 章 岩体弹塑性理论	- 7 -
2.1 引言	- 7 -
2.2 岩体应力应变关系	- 8 -
2.3 塑性准则	- 9 -
2.4 塑性流动（增量）理论	- 13 -
参考文献	- 24 -
第 3 章 岩体强度理论	- 25 -
3.1 引言	- 25 -
3.2 Mises 强度理论	- 26 -
3.3 Coulomb-Navier 强度理论	- 27 -
3.4 Mohr 强度理论	- 29 -
3.5 Griffith 强度理论	- 30 -
3.6 压应力作用下岩石脆性破坏	- 33 -
3.7 脆性岩石破坏准则	- 34 -
参考文献	- 35 -
第 4 章 岩体流变理论	- 36 -
4.1 引言	- 36 -
4.2 应力应变时间关系	- 38 -

4.3	场方程.....	- 48 -
4.4	黏塑性模型.....	- 51 -
	参考文献.....	- 52 -
第 5 章	层状岩体.....	- 53 -
5.1	引言.....	- 53 -
5.2	层状岩体的弹性本构定律.....	- 53 -
5.3	层状岩体的弹塑性本构定律.....	- 54 -
5.4	层面的弹塑性本构定律.....	- 55 -
5.5	层状材料.....	- 58 -
5.6	黏滑机制力学模型初步分析.....	- 59 -
	参考文献.....	- 60 -
第 6 章	岩体力学模型的建立.....	- 62 -
6.1	引言.....	- 62 -
6.2	两种力学状态.....	- 63 -
6.3	岩体不连续力学状态.....	- 66 -
6.4	岩体连续力学状态.....	- 67 -
	参考文献.....	- 68 -
第 7 章	各向异性岩体中压力隧洞衬砌应力计算.....	- 69 -
7.1	引言.....	- 69 -
7.2	基本方程.....	- 69 -
7.3	三个特例.....	- 72 -
7.4	圆形压力隧洞衬砌应力分析.....	- 75 -
7.5	岩石流变性质的影响.....	- 79 -
7.6	算例.....	- 80 -
	参考文献.....	- 80 -
第 8 章	弹塑性岩体中圆形压力隧洞衬砌应力计算.....	- 81 -
8.1	引言.....	- 81 -
8.2	岩体的应力应变关系.....	- 82 -
8.3	均匀内压力作用的圆形孔口弹塑性应力分析.....	- 82 -
8.4	隧洞衬砌应力计算.....	- 85 -
8.5	隧洞放空和再加载过程中岩体和衬砌的工作状况.....	- 86 -
8.6	岩体力学参数.....	- 87 -
8.7	算例.....	- 87 -
	参考文献.....	- 88 -

第 9 章 岩体力学在地下工程设计中的应用.....- 90 -

9.1 引言.....- 90 -

9.2 隧洞设计理论的发展.....- 90 -

9.3 岩体力学性质与洞室围岩稳定性.....- 92 -

9.4 地下工程中待深入研究的课题.....- 99 -

参考文献.....- 103 -

第 10 章 洞室围岩岩爆机制与发生准则.....- 105 -

10.1 引言.....- 105 -

10.2 洞室应力状态对岩爆的影响.....- 105 -

10.3 洞室围岩脆性破坏.....- 106 -

10.4 圆形洞室岩石脆性破坏物理模拟.....- 114 -

10.5 岩爆发生准则.....- 119 -

10.6 岩爆烈度.....- 121 -

参考文献.....- 123 -

第 11 章 脆性岩石的力学特征.....- 125 -

11.1 引言.....- 125 -

11.2 天生桥引水隧洞岩石三轴强度及应力应变全过程试验.....- 125 -

11.3 鲁布格电站地下厂房岩石三轴应力应变试验.....- 129 -

11.4 天生桥引水隧洞岩石声发射试验.....- 129 -

参考文献.....- 132 -

第 12 章 两条平行隧洞岩爆发生的相互影响.....- 133 -

12.1 引言.....- 133 -

12.2 光弹性试验.....- 133 -

12.3 试验结果.....- 133 -

12.4 天生桥引水隧洞相互影响.....- 138 -

参考文献.....- 138 -

第 13 章 岩爆预测与治理的工程应用.....- 139 -

13.1 引言.....- 139 -

13.2 天生桥水电站隧洞岩爆造成围岩失稳.....- 139 -

13.3 由岩爆反分析确定岩体初始应力.....- 142 -

13.4 岩爆数值预测.....- 143 -

13.5 岩爆的治理.....- 147 -

13.6 鲁布革水电站地下厂房围岩稳定分析.....- 151 -

13.7 岩爆治理对策.....- 154 -

参考文献..... - 158 -

第 14 章 洞室围岩动力稳定性..... - 159 -

14.1 引言..... - 159 -

14.2 地面有爆炸源时地下洞室围岩破坏机理..... - 159 -

14.3 计算公式的推导..... - 160 -

14.4 算例..... - 167 -

参考文献..... - 167 -

第 15 章 重力坝坝基稳定性..... - 168 -

15.1 引言..... - 168 -

15.2 朱庄水库坝基抗滑稳定分析..... - 168 -

15.3 铜街子水电站坝基抗滑稳定分析..... - 178 -

15.4 坝基抗滑稳定安全准则..... - 185 -

参考文献..... - 186 -

中外文人名对照表..... - 187 -

后记..... - 189 -